

---

---

## СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

---

---

УДК 681.518.3: 535.243.2

В.Г. ПЕТРУК, С.М. КВАТЕРНЮК, О.Ю. ЛЕВЧЕНКО, О.В.ГУРКО

### ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ ЧАСТИНОК ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ

*Вінницький національний технічний університет,  
Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21010, Україна,  
тел.: +380 (432) 59-84-43, E-mail: [petrukvg@gmail.com](mailto:petrukvg@gmail.com)*

**Анотація.** Розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення для обробки спектрополяриметричних зображень частинок, розпізнавання частинок ПВС певного типів та визначення їх концентрацій з використанням спеціалізованих бібліотек функцій для обробки зображень MATLAB. Розпізнавання типу частинок фітопланктону здійснено за допомогою просторової кореляції зображень, що дозволило автоматизувати аналіз екологічного стану водних об'єктів.

**Ключові слова:** спектрополяриметрія, концентрація частинок, полідисперсні водні середовища

**Аннотация.** Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для обработки спектрополяриметрических изображений частиц, распознавания частиц ПВС определенного типа и определения их концентраций с использованием специализированных библиотек функций для обработки изображений MATLAB. Распознавание типа частиц фитопланктона реализовано с помощью пространственной корреляции изображений, что позволило автоматизировать анализ экологического состояния водных объектов.

**Ключевые слова:** спектрополяриметрия, концентрация частиц, полидисперсные водные среды

**Abstract.** Developed algorithms and software for processing spectropolarimetric images of particles, particle recognition PVE certain type and determine their concentrations using specialized libraries of functions for image processing MATLAB. Recognition particle type of phytoplankton is implemented using the spatial correlation of images, allowing automated analysis of the ecological status of water bodies.

**Keywords:** spectropolarimetry, concentration of particles, polydisperse water environment.

#### ВСТУП

Теоретичні та практичні аспекти аналізу екологічного стану водних об'єктів розвинуті недостатньо, а інтегральні показники, за якими оцінюється їх стан, у значній мірі є відносними і суб'єктивними. При цьому відомі методи дослідження частинок полідисперсних водних середовищ (ПВС) не дозволяють у повній мірі порівняти оптико-фізичні параметри частинок різних типів, що визначаються геометричними розмірами, формою, внутрішньою будовою, анізотропністю, спектральними і поляризаційними властивостями. А це, у свою чергу, призводить до неможливості точного розпізнавання частинок ПВС певних типів, зокрема, частинок фітопланктону, визначення та контролю їх концентрацій, що суттєво ускладнює адекватне оцінювання рівня забруднення водних об'єктів.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою дослідження є розроблення алгоритмічного і програмного забезпечення засобу обробки зображень частинок для автоматизованого контролю забруднення водних середовищ з використанням спеціалізованих бібліотек функцій для обробки зображень MATLAB.

#### АЛГОРИТМІЧНЕ І ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЧАСТИНОК

Використання ПЗЗ-камери дозволяє отримувати цифрові дифракційні спектрополяриметричні зображення частинок ПВС, що має ряд переваг: можливість комп'ютерної обробки зображень частинок, висока достовірність розпізнавання частинок певного типу, архівування та створення бібліотеки зображень частинок різних типів.

Загальний алгоритм роботи (рис. 2.а) засобу контролю концентрацій частинок ПВС спектрополяриметричним методом такий: на початку роботи встановлюються основні параметри експерименту – діапазон та крок зміни довжини хвилі зонduючого випромінювання. У випадку

застосування у якості джерела випромінювання перестроюваного монохроматора ці значення встановлюються за допомогою руху дифракційної ґратки кроковим двигуном. У випадку застосування напівпровідникових лазерів чи світлодіодних джерел випромінювання значення довжини хвилі визначаються їх характеристиками і змінюються дискретно. Далі здійснюється встановлення кута повороту поляризатора. ПЗЗ-камерою формується інформаційне зображення та записується у файл. Робота програми повторюється на інших довжинах хвиль. Далі здійснюється комплексна обробка зображень та розпізнавання типів частинок. Після проведення усіх вимірювань відбувається підрахунок частинок різних типів та обчислення їх концентрацій. Частинки фітопланктону ПВС, наприклад, синьо-зелених водоростей, використовуються у якості біоіндикатора, що дозволяє контролювати індекс забруднення водного середовища та клас якості води.

Загальний алгоритм обробки спектрополяриметричних зображень частинок з ПЗЗ камери такий (рис. 2, б) : виділення необхідного фрагменту; фільтрація зображення; підвищення контрасту; морфологічний аналіз; визначення параметрів частинок та їх статистичний аналіз; порівняння з характерними зображеннями для частинок певного типу та їх розпізнавання. Морфологічний аналіз зображення полягає у дослідженні форм окремих частинок і складається з таких операцій: структуризації зображення шляхом порівняння з шаблоном структуроутворюючого елементу заданої форми та розмірів; виділення контурів, які розділяють частинки, що поєднані у агломерати; бінаризації, тобто перетворення напівтонового зображення у чорно-біле; сегментації – формування сегментів зображення, що відповідають окремим частинкам.

На даний час існує ряд методів оброблення зображення, які призначені для вирішення конкретних задач. Вони реалізуються за допомогою спеціалізованих бібліотек функцій обробки зображень. Використаємо у подальшому аналізі MATLAB, що має як найбільш багату бібліотеку математичних функцій для обробки зображень, так і можливість роботи безпосередньо з контрольно-вимірювальними засобами підключеними до персонального комп'ютера через COM та USB порти [1, 2]. Графічний інтерфейс користувача розроблений у MATLAB R2008a для вікна обробки спектрополяриметричних зображень частинок ПВС наведено на рис. 1.

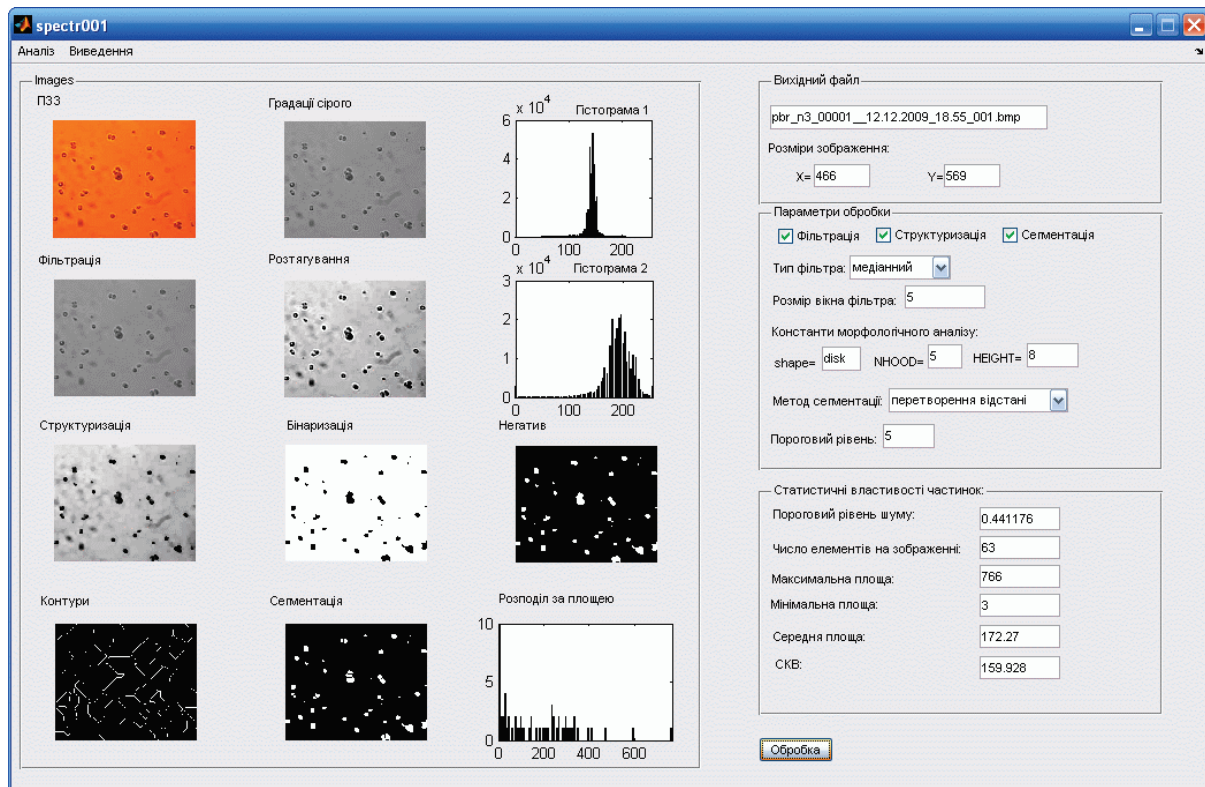


Рис. 1. Графічний інтерфейс користувача програми засобу контролю забруднення водних середовищ за спектрополяриметричним методом

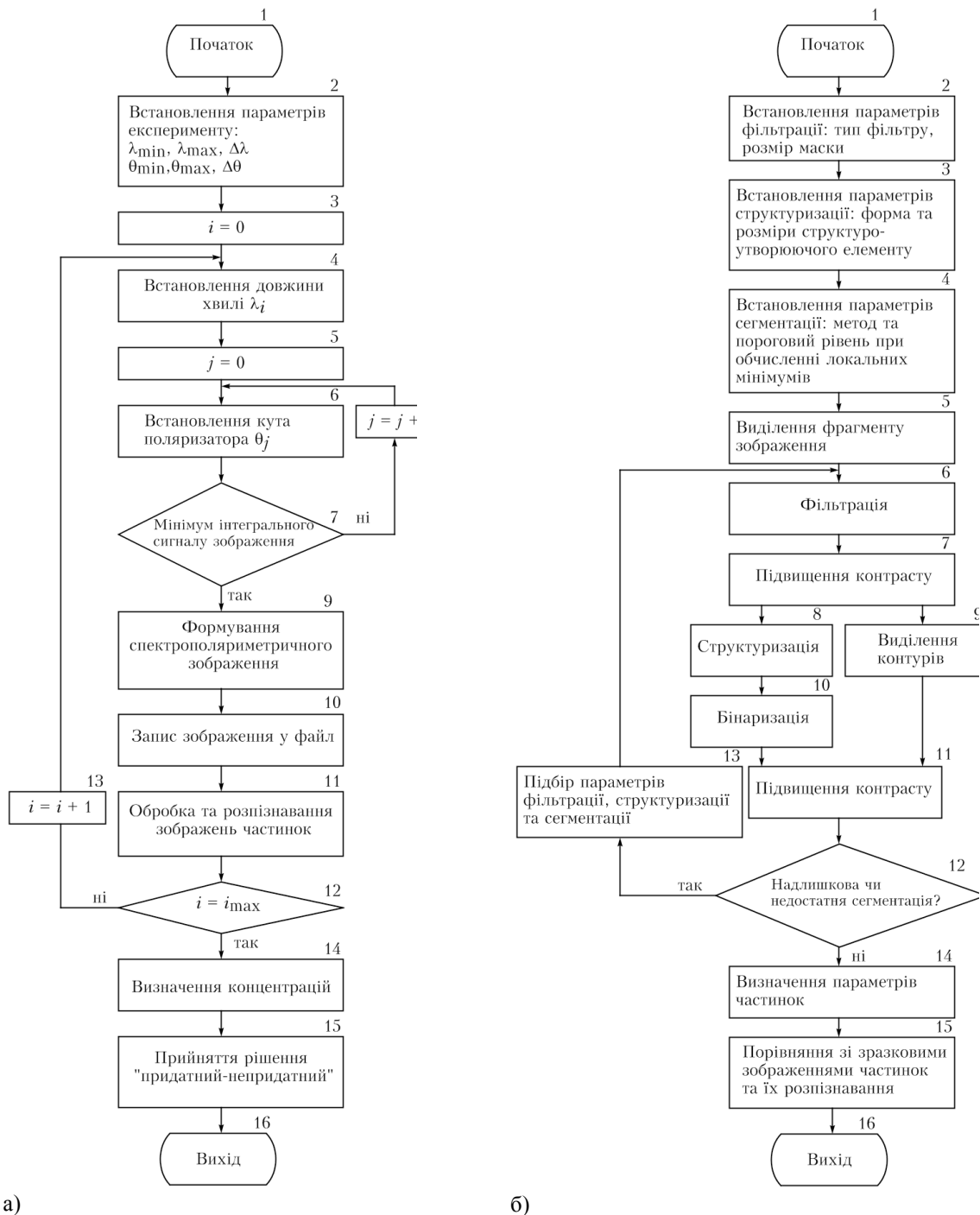


Рис. 2. Алгоритм роботи автоматизованого засобу контролю забруднення водних середовищ (а) і підпрограми обробки спектрополяриметричних зображень

### ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ ЧАСТИНОК ПОЛІДИСПЕРСНИХ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ У MATLAB

**Виділення необхідного фрагменту та фільтрація зображень частинок.** При роботі засобу контролю з товстим шаром ПВС та багатократним відбиванням на ПЗЗ-камері формується дифракційне зображення, що характеризує усереднені розміри частинок ПВС. Розміри частинок визначаються за допомогою обчислення різниці між дифракційними максимумами.

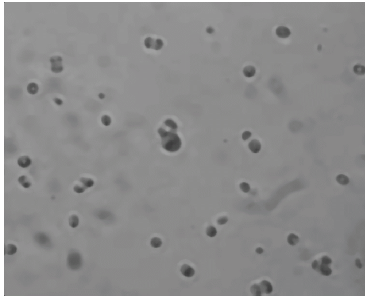


Рис. 3. Зображення частинок ПВС після медіанної фільтрації

Однак при роботі засобу контролю з тонким шаром ПВС, на ПЗЗ-камері формуються дифракційні спектрополяриметричні зображення декількох частинок. Розміри частинок визначаються переважно на основі геометричних розмірів контуру. Аналіз дифракційної частини зображення та порівняння її з типовими зображення допомагає підвищити достовірність розпізнавання частинок.

Для виділення зображення на фоні шумів використовується їх лінійна та нелінійна фільтрація. При застосуванні лінійної низькочастотної фільтрації здійснюється усереднення сусідніх елементів зображення, за рахунок чого зменшується величина високочастотних гармонік як шуму, так і корисного зображення. Це знижує рівні шуму, однак призводить до розмиття контурів зображення. Для того, щоб знизити рівень шуму без розмиття контурів зображення, необхідно використовувати нелінійну фільтрацію. Одним з найбільш поширених методів її здійснення є медіанний фільтр. Медіанний фільтр досить просто та ефективно придушує дрібнодисперсний шум, що виникає у ПЗЗ-камері (рис. 3). При застосуванні адаптивної медіанної фільтрації розмір вікна змінюється від мінімального до максимального залежно від характеристик зображення в області фільтрації. Ще більш ефективним фільтром для придушення завад на зображенні є фільтр Вінера. Фільтр Вінера, що шукає для елементів маски середнє значення та середньоквадратичне відхилення. Використання двовимірної фільтрації Вінера для обробки досліджуваних зображень вимагає більших витрат машинного часу у порівнянні з медіанною фільтрацією.

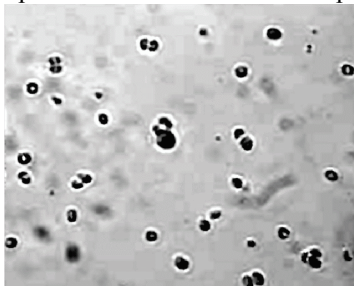


Рис. 4. Підвищення контрасту зображення за допомогою гамма-корекції

**Підвищення контрасту зображення частинок.** Контраст цифрового зображення на виході ПЗЗ-камери визначатиметься максимальним та мінімальним числам для пікселів, що відповідають мінімально та максимально освітленим елементам ПЗЗ-матриці  $E_N = (N_{\max} - N_{\min}) / (N_{\max} + N_{\min})$ . Для виділення необхідних елементів зображення використовують нелінійні криві перетворення яскравості застосовуючи гамма-корекцію. Використаємо лінійне перетворення яскравості зображення ( $k_{\text{gamma}} = 1$ ) та приймемо  $\delta = 1\%$ , при обмеженні діапазону градацій яскравості вхідного зображення.

**Морфологічний аналіз зображень.** Якщо орієнтовна форма частинок відома, то можливо здійснити пошук та інтерпретацію елементів зображення, використовуючи у якості маски матрицю, що містить шаблон структуроутворюючого елемента заданої форми та розмірів. Для аналізу окремих частинок ПВС необхідно здійснити сегментацію зображення на окремі області (рис.5).

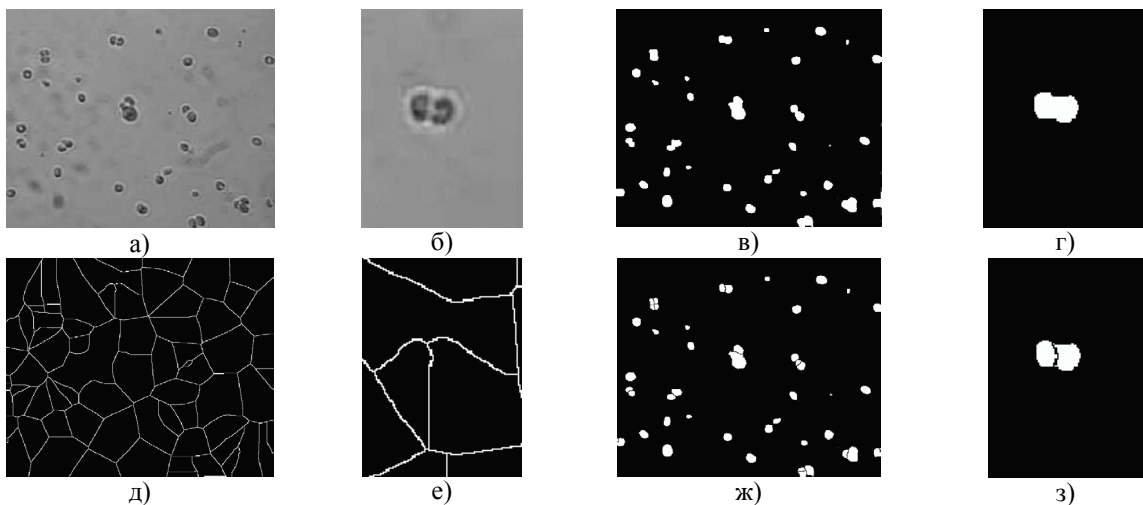


Рис. 5. Сегментація зображення: а) початкове зображення; в) бінаризоване зображення; д) контури водорозділів; ж) сегментоване зображення; б), г), е), з) збільшені фрагменти відповідних зображень

Недоліком усіх методів сегментації є помилки при розділенні зображень частинок, які накладаються. Помилки можуть бути двох типів: надлишкова сегментація – зображення частинки

розбите на сегменти; недостатня сегментація – зображення декількох частинок не розділене. Помилки цих двох типів зменшуються при правильній настройці порогових значень сегментації, а також попередніх ланок фільтрації та структуризації.

Виділення контуру частинки, при роботі у режимі однократного розсіювання моношаром частинок, полягає у побудові границі об'єкту. При роботі у режимі товстого шару рідини та багатократного відбивання необхідно будувати контури дифракційних максимумів зображення та обчислювати різницю між ними. Для виділення контурів можна використати методи високочастотної фільтрації, просторового диференціювання та функціональної апроксимації. Для виділення контурів існують оператори Роберта, Лапласа, Собела, Кені, Уоллеса, Кірша, що реалізовані у багатьох математичних пакетах.

**Визначення розмірів частинок ПВС та їх статистичний аналіз.** Отримавши сегментоване зображення, у якому кожна частинка представлена на цифровому зображенні сегментом, визначимо площу кожного сегменту та проведемо статистичну обробку цих даних. Найбільш оптимальним з точки зору компромісу між надлишковою та недостатньою сегментацією для даного зображення частинок ПВС виявилось застосування двовимірного фільтру Вінера. Метод сегментації з використанням маркерів локальних мінімумів є більш прийнятним, оскільки, при встановленні необхідного порогового рівня при обчисленні локальних мінімумів, дає менший рівень як дрібнодисперсних шумів, так і розділяє на окремі сегменти частинки, які поєднані у агломерати.

**Розпізнавання частинок ПВС на основі порівняння з характерними зображеннями для частинок певного типу.** На основі статистичних даних по середньому розміру частинок  $\langle \rho \rangle$  чи їх показнику заломлення  $\langle m \rangle$  можливо розпізнати частинки певного типу. Однак суттєвим недоліком такого підходу є необхідність побудови калібровочних кривих для обчислення емпіричних коефіцієнтів, крім того при цьому не враховується структура та форма частинок, адже для частинок складної структури та форми неможливо підібрати суспензію з штучно створеними частинками параметри яких відомі. Тому доцільно здійснювати безпосереднє порівняння дифракційних спектрополяриметричних зображень частинок із зображеннями для частинок відомого типу, структури, форми та розмірів визначеними за допомогою зразкового засобу вимірювань, наприклад, за допомогою електронного мікроскопу.

Найпростішим методом порівняння є обчислення різницевого зображення  $\Delta N_{ij}$  між елементами вимірюного і еталонного зображення  $\Delta N_{ij} = N_{ij} - N_{et.ij}$ .

Тому, метод порівняння є неприйнятним. Доцільно використати такий метод розпізнавання частинок, що дозволить порівнювати зображення частинок різних розмірів та забезпечить найменше значення помилки розпізнавання.

Одним з таких підходів є пошук просторової кореляції зображень (рис.6). При аналізі початкового зображення  $f_1(x, y)$  кореляційна задача полягає у знаходженні позицій на зображенні, що краще всього відповідають заданому еталонному зображенню  $f_2(x, y)$ . Оскільки просторова кореляція зображень зводиться до виразу:

$$F(f_1(x, y) \circ f_2(x, y)) = F_1(u, v) \cdot F_2^*(u, v),$$

де  $f_1(x, y) \circ f_2(x, y)$  – просторова кореляція;  $F_1(u, v)$  – Фур'є-образ зображення  $f_1(x, y)$ ;  $F_2^*(u, v)$  – комплексно-спряжена функція від Фур'є-образу зображення  $f_2(x, y)$ .

Для порівняння зображень різної розмірності використаємо їх обробку у частотній області за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ).

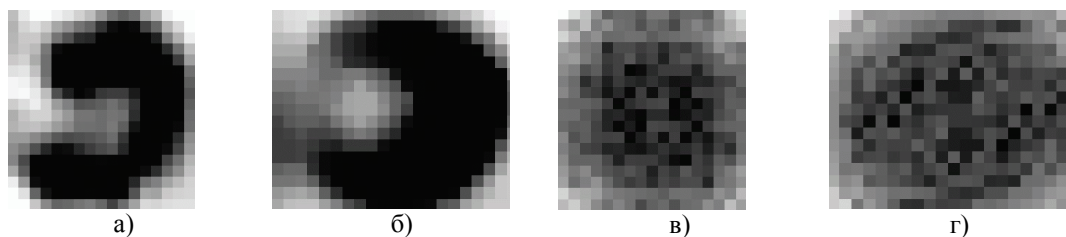


Рис. 6. Розпізнавання частинок за допомогою просторової кореляції:

а) зображення досліджуваної частинки  $f_1(x, y)$ ; б) зразкове зображення  $f_2(x, y)$ ;

в) ДПФ  $f_1(x, y)$ ; г) ДПФ  $f_2(x, y)$



Загальна схема прийняття рішень при розпізнаванні частинок наведена на рис. 7. На основі такої схеми проводиться розпізнавання частинок серії спектрополяриметричних зображень. Рішення про приналежність частинок до певної групи здійснюється по максимальному рівню коефіцієнту кореляції. Якщо отримане значення максимального коефіцієнту кореляції не перевищує заданого порогового значення, то частинка не відповідає жодному типу з наявних. Використання просторової кореляції зображень за допомогою згортки у частотній області із застосуванням ДПФ дозволяє провести розпізнавання частинок серії спектрополяриметричних зображень та отримати співвідношення частинок різних груп у ПВС, що дозволяє об'єктивно оцінювати рівень забруднення водних середовищ. У якості зразку може бути використано калібрувальну латексну суспензію із відомими параметрами, що призначена для перевірки засобів контролю полідисперсних рідин [4]. При обробці масивів спектрополяриметричних зображень виявлено, що для отримання високого значення вірогідності контролю достатньо обмежитись спектрополяриметричними зображеннями, отриманими на характеристичних довжинах хвиль, які відповідають екстремумам на спектральних залежностях пігментів, що входять до складу частинок ПВС, а також кутами обертання поляризатора та аналізатора, що відповідають мінімуму інтенсивності світлового потоку, який потрапляє на ПЗЗ-камеру.

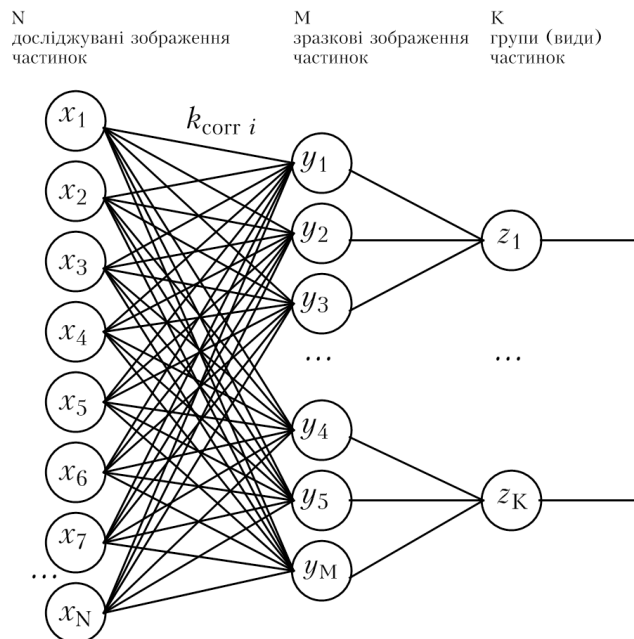


Рис. 7. Схема розпізнавання частинок на основі порівняння коефіцієнтів двовимірної кореляції зі зразковими частинками

При розробці засобів експрес-контролю стану ПВС його робота буде відбуватись лише на фіксованих довжинах хвиль, а у якості джерела випромінювання використовуватимуться напівпровідникові лазери чи світлодіодна лінійка у поєднанні з вузькосмуговими інтерференційними фільтрами. Розроблений метод та засоби контролю можуть також використовуватись і для дослідження інших видів полідисперсних рідин, зокрема, для контролю стану гуморальних (життєзабезпечуючих) середовищ живих організмів. На основі даних про концентрацію та відносне співвідношення частинок певних типів гуморальних середовищ можна зробити висновок про функціональний стан всього організму [5, 6].

Для підвищення достовірності розпізнавання частинок ПВС на підтипи можливо використовувати флуоресцентні барвники, що виявляють специфічні для конкретних видів частинок макромолекули. Таким чином можливо розрізнити частинки, зовнішня форма і внутрішня будова яких подібні, а тому спектрополяриметричні

зображення мало відрізняються.

## ВИСНОВКИ

Розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення засобу контролю забруднення водних середовищ для обробки спектрополяриметричних зображень частинок та розпізнавання частинок ПВС певного типів з використанням спеціалізованих бібліотек функцій для обробки зображень MATLAB. Для опрацювання отриманих спектрополяриметричних зображень частинок і розпізнавання типу частинок використано метод на основі просторової кореляції зображень перетворених, що дозволило більш точно аналізувати екологічний стан водних об'єктів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.
2. Чен К. MATLAB в математических исследованиях: Пер. с англ. / К. Чен, П. Джиглинг, А. Ирвинг – М. : Мир, 2001. – 346 с.
3. Спектрополяриметричні методи та засоби дослідження параметрів гуморальних середовищ / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський та ін.] // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – №1. – С. 128–131.

4. Analysette-22 NanoTec. Fritsch GmbH Manufacturers of Laboratory Instruments. Table of the technical specifications. – 24 p.
5. Кватернюк С. М. Засоби автоматизованого контролю оптично м'яких частинок гуморальних середовищ на основі методу спектрофотометрії зображень / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський та ін.] // П-ий Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю: міжнар. наук.-техн. конф., 23–26 вересня 2009 р.: матеріали конф. – Вінниця, 2009. – С. 341–344.
6. Кватернюк С. М. Розробка інтерактивних оптичних засобів для поляризаційної діагностики біотканин та гуморальних середовищ / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, Г. О. Черноволик та ін.] // Применение лазеров в медицине и биологии: XXII міжнар. наук.-практ. конф., 21–24 жовтня 2007 р.: тези допов. – Ялта, 2007. – С. 135–136.

Надійшла до редакції 13.04.2011р.

**ПЕТРУК В. Г.** – директор інституту екології та екологічної кібернетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**КВАТЕРНЮК С. М.** – науковий співробітник кафедри екології та екологічної безпеки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**ЛЕВЧЕНКО О. Ю.** – студентка інституту екології та екологічної кібернетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**ГУРКО О. В.** – студентка інституту екології та екологічної кібернетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.